

Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von Kohlenstofffaserrovings und Qualitätsprüfung des kombinierten VARI-Press Herstellungsverfahrens für faserverstärkte Kunststoffe mit umgelenkter Faserstruktur

W. Pangboonyanon, D. Meiners

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

woramon.pangboonyanon@tu-clausthal.de

Abstract

Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) sind heutzutage aufgrund ihrer hervorragend hohen spezifischen Festigkeit und Steifigkeit mehr und mehr von Bedeutung. Um ein großes Bauteil, wie z.B. einen Flugzeugrumpf herzustellen, werden einzelne Elemente aus FVK durch Nieten gefügt. Durch die zum Fügen notwendigen Bohrungen werden die FVK durch Spannungskonzentrationen zusätzlich belastet und das Versagen tritt meist in diesem Bereich auf. Um die Spannungskonzentration im Verbindungsbereich zu reduzieren, soll der Faserverlauf im Bauteil so ausgerichtet werden, dass die Fasern um die Bohrungen umgelenkt werden und die Kraft so kontinuierlich übertragen werden kann. Faserumlenkungen können durch verschiedene Mechanismen erfolgen, eine kontaktfreie Umlenkung von Fasern mit Hilfe elektrischer und magnetischer Energie bietet jedoch eine hohe Flexibilität bei der Bauteilgestaltung und kann vielseitig eingesetzt werden.

Diese Arbeit beschäftigt sich daher mit der Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von Kohlenstofffaserrovings und mit der Qualitätsprüfung des kombinierten Herstellungsverfahrens Vacuum-Assisted-Resin-Infusion-Press (VARI-Press), welches für die spätere Bauteilherstellung mit umgelenkter Faserstruktur verwendet wird. Untersucht werden in dieser Arbeit die Kohlenstofffaserrovings Tenax-E HS45 und ein unidirektionales Glasfasergelege HP-U400E mit einem Epoxidharzsystem. Als Ergebnis wird das Verhältnis von Spannung-Strom-Temperatur der Kohlenstofffaserrovings und deren Wärmekoeffizient gezeigt. Weiter wird die Reproduzierbarkeit des VARI-Press Verfahrens in Bezug auf die Laminatdicke und den Faservolumengehalt untersucht.

1 Einleitung

Faserverstärkte Kunststoffe kommen heutzutage dank ihrer hohen spezifischen Festigkeit insbesondere in der Luft- und Raumfahrt und der Automobilindustrie mehr und

mehr zum Einsatz. Dennoch sind die Kenntnisse bezüglich deren Charakteristika unter unterschiedlichen Beanspruchungen noch Stand der Forschung, da die Parameter, welche die Eigenschaften beeinflussen sehr komplex sind. Im Allgemeinen werden FVK je nach Anforderungen der Endbauteile nach der Herstellung nachbearbeitet, beispielsweise durch Fräsen, Bohren oder Schleifen. Durch diese Prozessschritte werden die Faserverläufe im FVK, welche eine Funktion zur Kraftübertragung leisten, beschädigt und durchtrennt. Dieses führt aufgrund der Kerbwirkung zu lokalen Delaminationen, Spannungskonzentrationen und schlussendlich zum Versagen eines Bauteils [1]. Solche Defekte können vermieden werden, indem die Fasern möglichst berührungsfrei im Lochbereich umgelenkt und dadurch kontinuierlich positioniert werden. Die berührungsfreie Positionierung der Fasern kann mit Hilfe der Lorentz-Kraft, resultierend aus elektrischer und magnetischer Energie erfolgen. Das Umlenkungskonzept ist in Abb. 1 dargestellt.

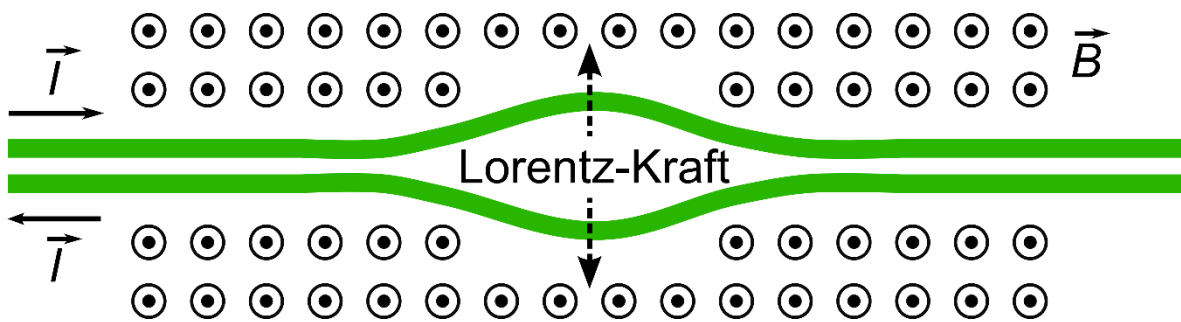


Abb. 1: Darstellung der umgelenkten Kohlenstofffaserrovings mit Hilfe der resultierenden Lorentz-Kraft aus elektrischem und magnetischem Feld

Um das Positionierungskonzept im Folgenden optimal gestalten zu können, ist es in erster Linie wichtig, Kenntnisse bezüglich der elektrischen Eigenschaften der Fasern zu gewinnen, sowie ein geeignetes Herstellungsverfahren für die FVK mit umgelenkter Faserstruktur im Trockenzustand zu finden. Ziel dieser Arbeit ist daher die Ermittlung der elektrischen Eigenschaften der FVK, der relevanten relativen Kennwerte und deren Abhängigkeiten zueinander. Weiterhin werden die Randbedingungen zur Faserumlenkung bestimmt und ein geeigneter Herstellungsprozess zur einfachen Produktion von reproduzierbaren Proben entworfen.

2 VARI-Press Verfahren zur Herstellung von Faserverbunden mit umgelenkter Faserstruktur

Aufgrund der nur schwer einstellbaren Prozessparameter wie dem Faservolumengehalt bzw. der Dicke des Laminates beim herkömmlichen Vakuum-Assisted-Resin-Infusion

(VARI) Verfahren, wird in dieser Arbeit das VARI Verfahren mit einem Pressverfahren zur Herstellung der Proben kombiniert. Hierbei werden die Trockenfaserlagen mittels eines Flüssigharzes imprägniert, welches durch die Druckdifferenz zwischen Anguss und Absaugung eines einseitig angelegten Vakuums gezogen wird. Das Vakuum unterstützt dabei nicht nur die Durchtränkung der Fasern durch das Harz, sondern auch die Entgasung der Harzmasse im Laminat [2]. Im Anschluss an die Infusion findet ein Pressvorgang statt, bei dem das infiltrierte Laminat auf eine kontrollierte Kavitätshöhe mittels einer Heißpresse endgeformt wird. Nach dem Pressen wird das Laminat im Ofen bis zur vollständigen Aushärtung des Harzes nachgetempert. Nach dem Tempern ist das Laminat bereit für die weitere Verarbeitung. In der folgenden Tabelle (Tab. 1) sind die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens aufgelistet.

Tab. 1: Vor- und Nachteile des VARI-Press Verfahrens

Vorteil	Nachteil
Verbesserte Bauteilqualität im Vergleich zu VARI	Manuelle Arbeitsschritte
Kontrollierbare Faservolumengehalte und Wanddicken	Begrenzte Formbarkeit
Kürzere Prozesszeiten durch direkte Beheizung und gleichzeitiges Pressen	Begrenzte Gestaltungsmöglichkeiten
Reproduzierbare Ergebnisse	-

3 Kontaktfreie Umlenkung elektrisch leitfähiger Fasern mittels Lorentz-Kraft

Die Lorentz-Kraft ist definiert als die resultierende Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter innerhalb eines homogenen magnetischen Feldes. Die wirkende Kraft steht normal zur Ebene, welche durch die Richtung des Magnetfeldes und die Stromrichtung aufgespannt wird.

Berechnet wird die Lorentz-Kraft entsprechend durch das Vektorprodukt aus der durch den Magnet aktivierten Länge des Leiters und dem homogenen magnetischen Feld.

$$\vec{F}_B = \vec{I} L \times \vec{B}$$

Da einige Fasertypen, wie beispielsweise Kohlenstofffasern elektrisch leitend sind, wird im Rahmen dieser Arbeit angenommen, dass diese Fasern als stromdurchflossener Leiter betrachtet werden können und oben genannte Gleichung gilt. Werden die leitenden

Fasern durch eine Stromquelle mit dem Strom \vec{I} durchflossen und in einem magnetischen Feld \vec{B} mit der wirkenden Länge L eingesetzt, werden die Fasern durch die Lorentz-Kraft \vec{F}_B umgelenkt. [4]

4 Elektrische Eigenschaften von Fasern

Im Allgemeinen kann der Widerstand eines Werkstoffes aus dem Quotienten einer angelegten Spannung und des resultierenden Stroms bestimmt werden. Für die meisten Werkstoffe wird die elektrische Eigenschaft durch den spezifischen Widerstand ρ in Ωm angegeben, welcher als der Widerstand zwischen zwei gegenüberliegenden Oberflächen eines Würfels mit der Kantenlänge von 1 Meter definiert ist. Diese Definition gilt allerdings nur für homogene Werkstoffe. Für Textilfasern werden die elektrischen Eigenschaften im Gegensatz zu anderen Werkstoffen wie Metall aufgrund deren Feinheit mit Hilfe des gewichtsspezifischen Widerstands definiert. Der gewichtsspezifische Widerstand hat die Einheit $\Omega\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$ und ist definiert als ein Widerstand in Ohm zwischen zwei Enden eines 1 Meter langen und 1 kg wiegenden Probekörpers. Er ist abhängig vom spezifischen Widerstand ρ und der Dichte d des Werkstoffes.

$$R_s = \rho d$$

Der Widerstand eines Probekörpers aus mehreren Faserbündeln (Faserrovings) ist demzufolge abhängig vom gewichtsspezifischen Widerstand R_s , der Länge l , der Feinheit T in tex und der Anzahl der Faserrovings N . [5]

$$R = R_s \frac{l}{NT}$$

5 Versuchsdurchführung

5.1 Materialien

5.1.1 Glasfaser

Verwendet wird in dieser Arbeit ein Glasfasergelege der Firma HP-Textiles mit der Bezeichnung HP-U400E. Die wichtigsten technischen Daten sind unten angegeben.

Tab. 2: Technische Daten des verwendeten Glasfasertextils

Material	Bezeichnung	Konstruktion	Flächengewicht in g/m ²	Gesamtflächengewicht in g/m ²
E-Glas	Unidirektionales Glasgelege	[0°/90°/Nähfaden]	[402/40/15]	457

5.1.2 Kohlenstofffaserrovings

Untersucht werden in dieser Arbeit die Kohlenstofffaserrovings CF Tenax E-HS45 der Firma Teijin Europe. Die, für die durchgeführten Versuche, relevanten Informationen sind folgend tabellarisch angegeben.

Tab. 3: Technische Daten der untersuchten Kohlenstofffaserrovings

Materialmerkmal	Einheit	Wert
Bezeichnung	-	Tenax-E HTS45
Filamentanzahl	Filament	12.000
Garnfeinheit	tex	800
Zugfestigkeit	MPa	4.500
Filamentdurchmesser	µm	7,0
Filamentdichte	g/cm ³	1,77
Spezifischer Widerstand bei Raumtemperatur	10 ⁻⁵ Ωm	1,6

5.1.3 Matrixsystem

Für die Herstellung des faserverstärkten Laminats wird das Epoxidharzsystem EPIKOTE mit dem Harz RIMR135 und dem Härter RIMH1366 von der Firma Hexion verwendet, welches eine Dichte von 1,2 g/cm³ besitzt.

5.2 Prüfung der Qualität des Herstellverfahrens

Aufgrund der oben genannten Nachteile des herkömmlichen VARI Verfahrens, wird in dieser Arbeit ein Herstellungsverfahren entworfen, welches für die hohen Qualitätsanforderungen dieser Arbeit eine ausreichend gute Reproduzierbarkeit liefert und gleichzeitig die Nachteile reduziert. Wie in Abschnitt 2 bereits beschrieben, wird in dieser Arbeit das VARI-Press Verfahren für die Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen

untersucht. Ziel ist es, reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten, entsprechend gleichmäßige und kontrollierbare Faservolumengehalte, Dimensionen sowie Dicken der Laminat. In diesem Abschnitt der Arbeit werden die Dicken und die Faservolumengehalte der mittels VARI-Press Verfahrens hergestellten Laminat als Qualitätsmerkmale geprüft. Als Randbedingungen werden ein Faservolumengehalt von 53,18 % und eine Laminatdicke von 2,45 mm als rechnerischer Sollwert gewählt. Die Lagenzahl wird demzufolge in Abhängigkeit des Flächengewichts und der Dichte des Textils berechnet. Die benötigte Lagenzahl beträgt somit 8 Lagen. Diese werden unidirektional im Winkel von 0° , bezogen auf die Längsrichtung, gestapelt. Nach dem Faserlagenaufbau wird das Laminat unter Vakuum mit dem entlüfteten Matrixsystem aus Abschnitt 5.1.3 bei Raumtemperatur infiltriert. Dieser Schritt dauert je nach Größe des Laminats 1 bis 3 Stunden. Nach der Infiltration wird das Laminat mit Hilfe von Blecheinlegern als Abstandhalter auf eine Kavitätsdicke von 2,45 mm durch eine Heißpresse bei 80°C gepresst. Das Laminat wird für mindestens eine Stunde unter Druck gehalten. Abschließend wird das Laminat bei 80°C im Ofen bis zur vollständigen Aushärtung nachgetempert. Abb. 2 zeigt den Laminataufbau während der Infusion (a) und das Laminat nach der Imprägnierung unter der Presse (b).

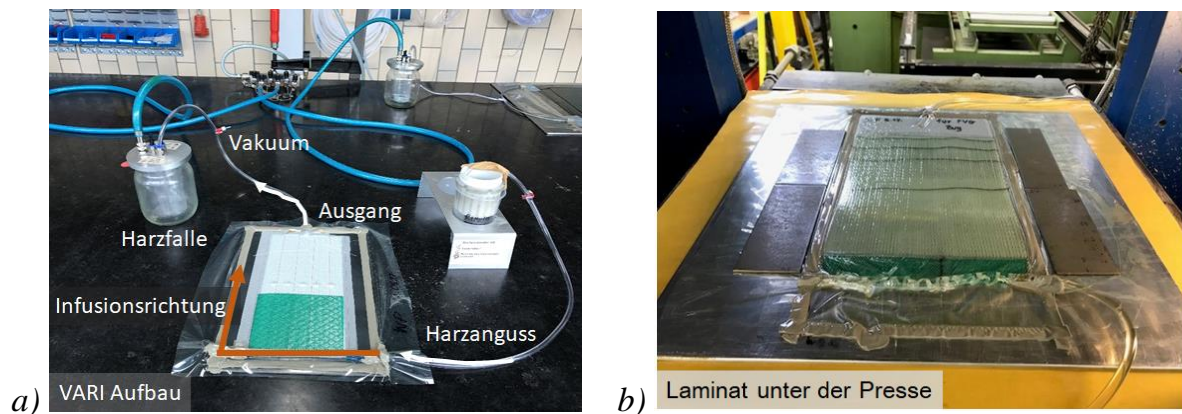


Abb. 2: Herstellung VARI-Press: a) Darstellung des VARI Aufbaus mit Infusionsrichtung, b) Laminat unter der Heißpresse

Zur Prüfung der Reproduzierbarkeit dieses Verfahrens werden die glasfaserverstärkten Laminat in 39 kleinere Segmente aufgeteilt (Abb. 4a) und ihre Dicke jeweils an drei Punkten durch einen Messschieber (Genauigkeit 0,01 mm) bestimmt. Deren Mittelwert wird als die Dicke der jeweiligen Probe angenommen. Für die Bestimmung des Faservolumengehalts wird die Prüfung laut [6] durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 6.1 gezeigt.

5.3 Untersuchung der elektrischen Eigenschaften von Kohlenstofffasern

Wie in Abschnitt 3 beschrieben kann ein elektrisch leitender Faseroving mittels Lorentz-Kraft umgelenkt werden. Zur Gestaltung eines Faserumlenkungssystems ist es in erster Linie wichtig, Kenntnisse über das elektrische Verhalten von Kohlenstofffasern zu gewinnen, um so die Systemgrenzen sowie die Randbedingungen definieren zu können. Untersucht werden die Kohlenstofffaserovings aus Abschnitt 5.1.2. Die Rovings werden in einer Stromquelle fixiert und ein definierter Strom wird eingestellt. In Abb. 3 ist der Versuchsaufbau zu sehen. Gemessen wird der fließende Strom, die Spannung und die Temperatur der Rovings. Der Strom und die Spannung werden schrittweise erhöht, bis es zu einer Schädigung der Rovings aufgrund von Oxidation kommt. Um eine statistische Auswertung zu ermöglichen werden 10 Wiederholmessungen durchgeführt.

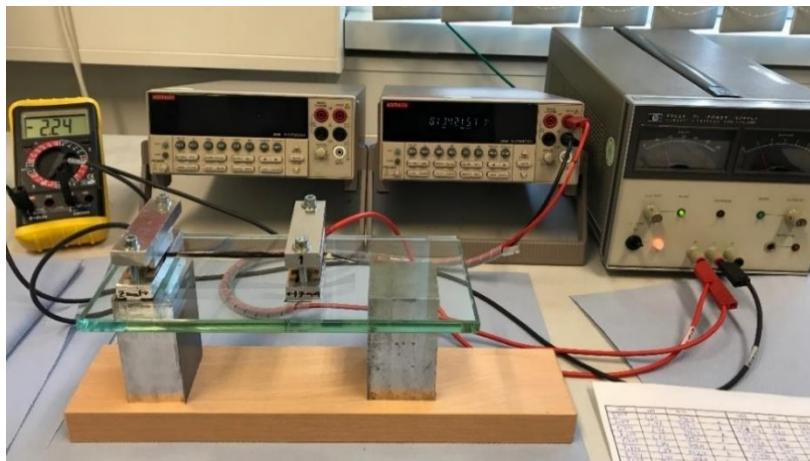


Abb. 3: Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der elektrischen Eigenschaften

6 Ergebnisse

6.1 Qualität der Proben durch den VARI-Press Prozess

Die Ergebnisse der Qualitätsprüfung des VARI-Press Verfahrens zeigen, dass dieses Verfahren sowohl eine gleichmäßige Laminatdicke als auch einen gleichbleibenden Faservolumenanteil innerhalb des gesamten Laminats ermöglicht (Abb. 4b). Änderungen der Laminatdicke in Infusionsrichtung, wie sie beim herkömmlichen VARI Prozess auftreten, können gut vermieden werden. Ein Laminat, welches im VARI Verfahren hergestellt wird, zeigt in der Regel eine sinkende Dicke in Richtung zur Absaugung.

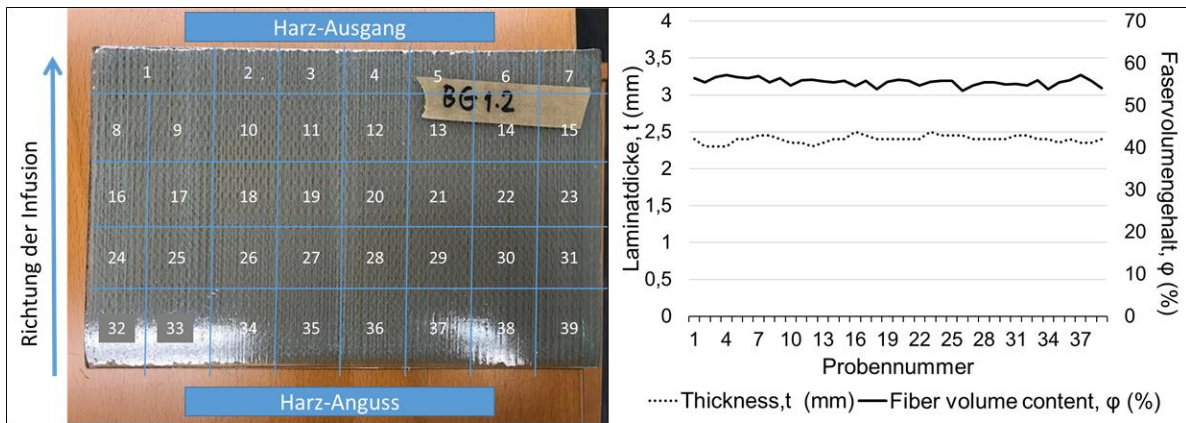


Abb. 4: Proben zur Qualitätsprüfung des VARI-Press Verfahrens (links), Probendicken in mm und Faservolumengehalte in % der Einzelproben (rechts)

Die durchschnittliche Laminatdicke und der durchschnittliche Faservolumengehalt betragen $2,4 \pm 0,05$ mm (min. 2,3 mm/max. 2,5 mm) bzw. $55,61 \pm 0,91$ % (min. 53,51 %/max. 57,26 %) bei eingestellten Sollwerten von 2,45 mm bzw. 53,18 %. Die geringen Schwankungen ermöglichen bei der Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften in späteren Arbeiten eine Normierung auf einen Faservolumengehalt von 55,61 %.

6.2 Ermittlung der relevanten Randbedingungen zur Umlenkung von Kohlenstofffaserverrovings

Nach der Messung von Spannung, Strom und Temperatur der Kohlenstofffasern in Abschnitt 5.1.2 können die Ergebnisse als Spannung-Strom-Temperatur-Diagramm dargestellt werden. Gezeigt werden die resultierenden Spannungen und Temperaturen der sich selbsterwärmenden Fasern bei fest eingestellten Strömen (Abb. 5). Durch die Messungen kann die beginnende Oxidation der Kohlenstofffaser bei circa 400°C gezeigt werden, was sich gut mit den Ergebnissen von [7] deckt. Eine große Streuung der Messdaten ab etwa 500°C ist zu erkennen, da die Kohlenstofffasern durch die Oxidation zersetzt werden und sie dadurch ihre ursprüngliche Feinheit verlieren.

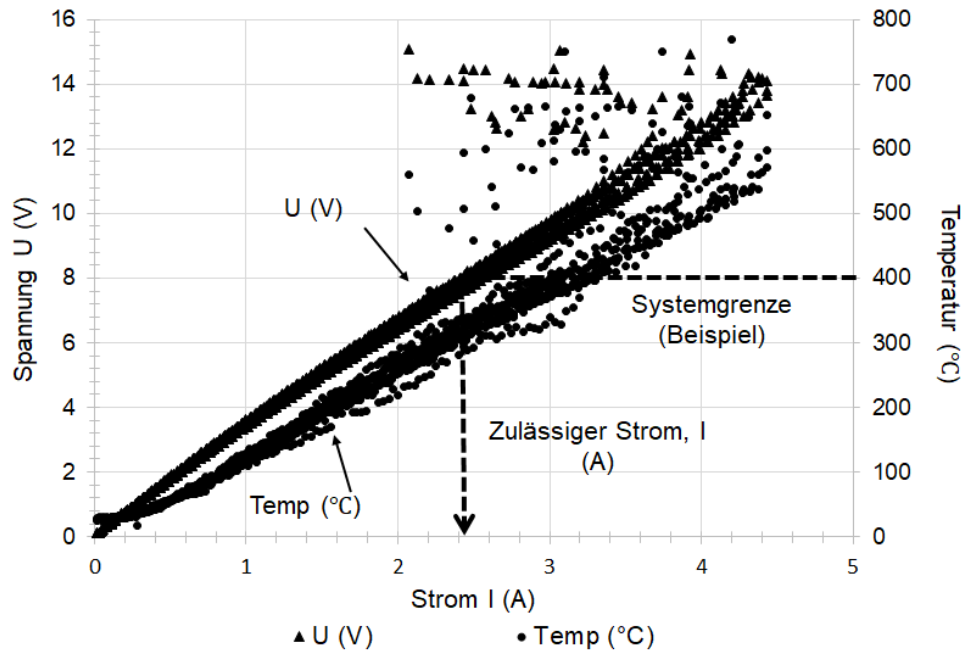


Abb. 5: Graphische Darstellung der Ergebnisse: Spannung-Strom-Temperatur-Verlauf mit beispielhafter Systemgrenze

In Folge dessen kommt es zu einem Anstieg des elektrischen Widerstandes der Fasern. Einerseits führt dies bei gleichbleibender Spannung zu einer reduzierten Stromstärke, weshalb eine höhere magnetische Flussdichte für die Umlenkung notwendig wäre und zum anderen zu schlechteren mechanischen Eigenschaften des FVK. Anhand einer max. zulässigen Temperatur als Systemgrenze, kann ein zulässiger Strom für die Umlenkung durch die Messdaten bestimmt werden.

Da Kohlenstofffasern in die Gruppe der Heißeiter gehören, ist es wichtig, die Einflüsse erhöhter Temperaturen auf den elektrischen Widerstand zu berücksichtigen [8]. Im Allgemeinen gilt für die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes $R_T = R_0(1 + \alpha(T_T - T_0))$ und für Textilfasern im Speziellen $\rho_T = R_T \frac{T}{dl} = [R_0(1 + \alpha(T_T - T_0))](\frac{T}{dl})$, wobei $\frac{T}{dl}$ konstant ist. Demzufolge gilt $\rho_T = \left(\alpha R_0 \frac{T}{dl}\right)(T_T - T_0) + \left(R_0 \frac{T}{dl}\right)$. Wird dieser Zusammenhang grafisch dargestellt, kann $\left(\alpha R_0 \frac{T}{dl}\right)$ als Steigung einer Geraden und $\left(R_0 \frac{T}{dl}\right)$ als Y-Achsenabschnitt angesehen werden. Anhand der Messdaten wird der spezifische Widerstand (E-05 Ωm) in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zur Referenztemperatur $T_0 = 20^\circ C$ berechnet und grafisch in Abb. 6 aufgezeichnet. Durch Division der Steigung durch den Wert des Y-Achsenabschnittes kann der Wärme­koeffizient berechnet werden. Dieser beträgt hier $-0,00042 \text{ } 1/^\circ C$. Aufgrund der Streuung der Messdaten durch die auftretende Oxidation bei erhöhten Temperaturen wird der spezifische Widerstand in Abb. 6 nur bis zu einer Temperatur von $380^\circ C$ dargestellt.

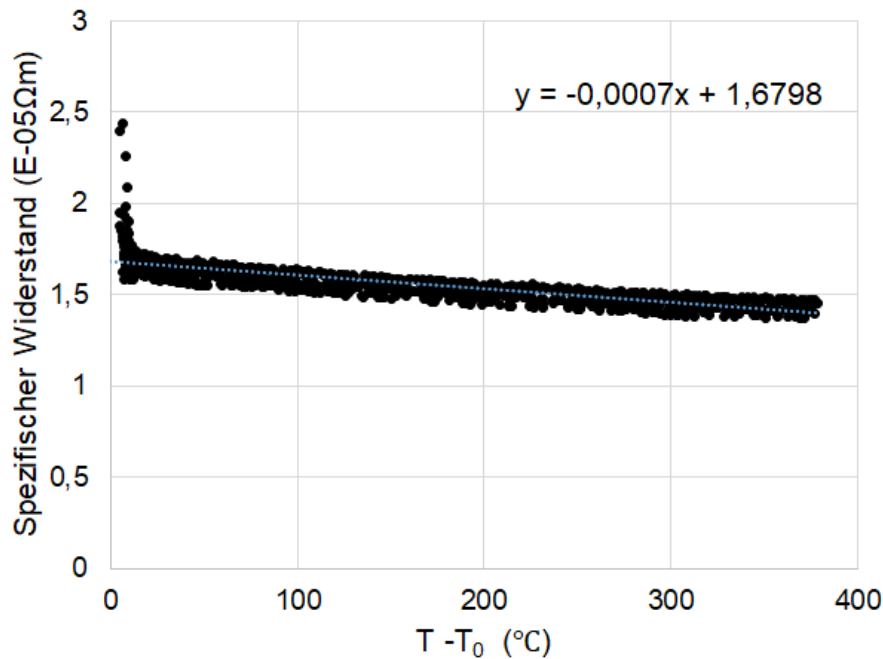


Abb. 6: Graphische Darstellung der Ergebnisse: Spezifischer Widerstand-Temperatur-Verlauf

Des Weiteren ist eine Streuung der Messdaten bei Raumtemperatur erkennbar. Erklärungen für dieses Verhalten liegen derzeit noch nicht vor, weitere Untersuchungen zur Abklärung werden jedoch in zukünftigen Arbeiten folgen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Faserverstärkte Kunststoffe mit umgelenkter Faserstruktur, beispielweise am Bohrungsbereich, bieten ein Potenzial zur Steigerung der Bauteilfestigkeit und aufgrund der Flexibilität eine Minimierung des Arbeitsaufwands während der Nachbearbeitung. Dafür ist ein kostengünstiges reproduzierbares Herstellungsverfahren von Bedeutung. Der VARI Prozess gehört zu einem der einfachsten und kostengünstigsten Flüssiginfusionsherstellungsverfahren der Faserverbunde. Allerdings ergeben sich hinsichtlich einiger Anforderungen auch Nachteile. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines kombinierten VARI-Press Verfahrens und einer anschließenden Qualitätsprüfung der Bauteile. Hierfür werden die Laminatdicke und der Faservolumengehalt des Laminats als Qualitätsmerkmale gewählt. Es kann gezeigt werden, dass das VARI-Press Verfahren eine reproduzierbare Bauteilqualität mit gleichmäßiger Laminatdicke ($\bar{t} = 2,4 \pm 0,05$ mm) bietet und dass der Faservolumenanteil im gesamten Laminat gleichmäßig ist ($\bar{\varphi} = 55,61 \% \pm 0,91 \%$).

Ein weiteres Ziel der Arbeit ist die Untersuchung einer möglichen Umlenkung von elektrisch leitenden Fasern vor ihrer Imprägnierung. Eine verbesserte Kraftleitung innerhalb des Bauteils kann durch eine solche Umlenkung ermöglicht werden und der Faserverlauf beispielsweise im Bereich von Bohrungen wird nicht gestört. Erhöhte Bauteilfestigkeiten und vereinfachte Nachbearbeitungen der Bauteile sind als Vorteil der Faserumlenkung zu nennen. Die Umlenkung soll mittels der aus anderen Bereichen bereits bekannten Lorentz-Kraft erfolgen. Zur Ermittlung des elektrischen Verhaltens von Fasern werden in dieser Arbeit Kohlenstofffaserrovings untersucht. Durch dessen Spannung-Strom-Temperatur-Verhalten kann der Wärmekoeffizient der Rovings berechnet werden. Das komplexe elektrische und thermische Verhalten der Rovings erschwert die Beschreibung des Systemverhaltens und auf klassische Berechnungsgrundlagen für homogene Materialien kann nicht zurückgegriffen werden. Alternative Berechnungsmöglichkeiten werden in dieser Arbeit jedoch präsentiert und das thermische und elektrische Verhalten der Rovings wird beschrieben.

Literatur

- [1] Öndürücü, A.; Esendemir, Ü.; Tunay, R. F.: Progressive Failure Analysis of Glass-Epoxy Laminated Pinned Joints. Materials and Design. Elsevier. 2012.
- [2] Ehrenstein, G. W.: Faserverbund-Kunststoffe – Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften. 2. vollständig überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag München Wien. 2006.
- [3] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen – Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York. 1999. – ISBN 3-540-61659-4
- [4] Serway, R. A.; Jewett, Jr. J. W.: Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. 8th Edition. Nelson Education. 2010. – ISBN-13: 978-1-4390-4844-3
- [5] Morton, W. E.; Hearle, J. W. S.: Physical properties of textile fibres. 4th Edition. Woodhead Publishing Limited. Cambridge. 2008. – ISBN 978-1-84569-220-9
- [6] Norm DIN EN ISO 1172: Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin: Beuth Verlag. 1998.
- [7] Westwood, M. E.; Webster, J. D.; Day, R. J.; Hayes, F. H.; Taylor, R.: Review Oxidation protection for carbon fibre composites. Journal of Materials Science. Issue 31. Page 1389-1397. 1996.

- [8] Hemmen, A.: Direktbestromung von Kohlenstofffasern zur Minimierung von Zykluszeit und Energieaufwand bei der Herstellung von Karbonbauteilen. Dissertation. Universität Augsburg. 2016.

Autorenanschriften

Woramon Pangboonyanon, M.Sc.

Technische Universität Clausthal

Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik

Agricolastraße 6

38678 Clausthal-Zellerfeld

Telefon: 05323-722549

Telefax: 05323-722324

E-Mail: woramon.pangboonyanon@tu-clausthal.de